

螞蟥菊发酵液对根结线虫和斜纹夜蛾的生物活性

庞晓雯, 谢钦铭

(集美大学水产学院 福建厦门 361021)

摘要: 为了开发外来入侵植物螞蟥菊在作物病虫害防治方面的应用, 探究了不同浓度螞蟥菊发酵液对 2 种有害生物(根结线虫和斜纹夜蛾)的生物活性, 设置以下两组试验, 一组以无菌水为对照(CK), 研究螞蟥菊发酵液母液(FB)、稀释 10 倍(FB10)、稀释 100 倍(FB100)3 个处理对根结线虫 2 龄幼虫的室内触杀效果; 另一组是以无菌水为对照(CK), 设置螞蟥菊发酵液母液稀释 5 倍(FB5)、15 倍(FB15)、45 倍(FB45)3 个处理, 用不同浓度螞蟥菊发酵液浸润处理芋头叶后喂养斜纹夜蛾低龄幼虫, 观察并记录斜纹夜蛾幼虫的生长发育情况; 还通过 LC-MS 技术对螞蟥菊发酵液的化学组分进行了分析。结果显示, 螞蟥菊发酵液对根结线虫 2 龄幼虫有一定的杀线虫活性, FB 处理南方根结线虫 2 龄幼虫 24、48、72 h 的校正死亡率分别为 25.54%、24.67%、24.89%, 而且 FB10、FB100 处理 48、72 h 的校正死亡率均可达 10% 以上。FB 处理对斜纹夜蛾 1 龄幼虫的校正死亡率为 34.15%, FB5 和 FB15 处理能延缓斜纹夜蛾幼虫发育历期, 降低斜纹夜蛾蛹质量, 但与 CK 差异不显著。在螞蟥菊发酵液的化学组分中, 甜菜碱占 8.78%, 高龙胆酸占 5.23%, 2,3-二羟基苯甲酸占 3.04%, D-酒石酸占 2.53%。综上, 螞蟥菊发酵液对根结线虫和斜纹夜蛾具有一定的生物活性, 可为后期用于开发出针对根结线虫和斜纹夜蛾等有害生物防控的中草药源植物保护剂提供参考。

关键词: 螞蟥菊; 发酵液; 南方根结线虫; 斜纹夜蛾; 生物活性; 成分分析

中图分类号: S476+.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)07-182-07

Biological activity of *Wedelia chinensis* fermentation solution against *Meloidogyne incongnita* and *Spodoptera litura*

PANG Xiaowen, XIE Qinming

(Fisheries College of Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China)

Abstract: In order to develop the application of the invasive alien plant *Wedelia chinensis* in crop pest control, this paper investigated the biological activity of different concentrations of *Wedelia chinensis* fermentation solution against two pests (*Meloidogyne incongnita* and *Spodoptera litura*) in the following two sets of experiments, one test is using different concentrations of *Wedelia chinensis* fermentation solution (stock solution FB, diluted 10 times FB10, and diluted 100 times FB100) for indoor contact-test against root-knot nematode second stage juvenile (J2); the other test is using different concentrations of *Wedelia chinensis* fermentation solution (diluted 5 times FB5, diluted 15 times FB15, and diluted 45 times FB45) for soaking taro leaves and then fed to larvae of *Spodoptera litura*, and the growth and development of *Spodoptera litura* was observed and recorded. Both two sets of experiments used sterile water as a control group; the chemical components of *Wedelia chinensis* fermentation solution also were analyzed by LC-MS method. The results of the tests showed that the *Wedelia chinensis* fermentation solution had some nematicidal activity to root-knot nematodes J2, when root-knot nematodes J2 were treated with FB for 24 h, 48 h, and 72 h, the corrected mortality rates were 25.54%, 24.67%, and 24.89%, respectively. Moreover, after 48 h and 72 h of treatment with FB10 and FB100, the corrected mortality rates of root-knot nematodes J2 both were above 10%. The corrected mortality rate of *Spodoptera litura* 1st instar larvae was 34.15% by the FB. The FB5, FB15 inhibited the growth and development of *Spodoptera litura* larvae, delayed their developmental period and reduced pupal mass, but there is no significantly difference compared to the control group. Among the chemical components of *Wedelia chinensis* fermentation solution, proportion of betaine is 8.78%, proportion of homo-

收稿日期: 2024-09-07; 修回日期: 2025-04-12

基金项目: 苕苔生物肥关键技术与产品开发(上海海洋大学资助横向项目编号: 集大 S19098); 泉州师范学院福建省海洋藻类活性物质制备与功能开发重点实验室 2018 年度开放课题“防治茶叶假眼绿叶蝉的海藻植保剂的研发”(2018FZSK04); 福建农林大学国家重点实验室 2017 年度开放课题“海藻植保剂在辣木主要害虫中的生防应用研究”(SKB2017014)

作者简介: 庞晓雯, 女, 在读硕士研究生, 主要研究海藻液的农用功效。E-mail: 18702060170@163.com

通信作者: 谢钦铭, 男, 教授, 从事生态农业中病虫害生态控制技术研究。E-mail: qmxie@jmu.edu.cn

gentisic acid is 5.23%, proportion of 2,3-Dihydroxybenzoic acid is 3.04%, and proportion of *D*-tartaric acid is 2.53%. In conclusion, the *Wedelia chinensis* fermentation solution has certain biological activities against root-knot nematode and *Spodoptera litura* larvae, which can be used as a reference for the later development of plant protection agents of herbal origin targeting the prevention and control of root-knot nematode and *Spodoptera litura* larvae and other harmful organisms.

Key words: *Wedelia chinensis*; Fermentation solution; *Meloidogyne incongnita*; *Spodoptera litura*; Bioactivity; Compositional analysis

我国是一个农作物种植、生产大国,而病虫害对作物的产量和品质都有较大的影响,病虫害已成为制约我国农业生产和可持续发展的重要因素之一。番茄生产过程中容易受到有害生物如根结线虫(*Meloidogyne incongnita*)、斜纹夜蛾(*Spodoptera litura*)等侵害,无论是单一或者叠加的病虫害均会加剧番茄植株的生理胁迫,最终由于防治困难而导致作物的减产减质。据统计报道,我国病虫害造成的农作物产量损失高达30%以上^[1]。目前我国农业生产对有害生物的防治措施主要还是使用化学药剂,虽然化学药剂有用量少、作用快、效率高等特点,但化学农药一般具有高毒性、高污染性,还会使害虫产生耐药性^[2]。因此,寻找安全高效的生物防治措施是大势所趋。

植物在生长发育过程中,会合成大量化学结构多样且具有独特机制的次生代谢活性物质,据报道已超过40万种,如木脂素类、生物碱、黄酮、酚类、萜烯类等均有一定的生理活性^[3],有的可以通过化感作用影响植物的生长发育,且具有抗虫、杀虫作用。通过深入研究这些植物次生代谢产物的结构与功能,人们可以将这些物质直接或间接应用于农业生产上。螞蟥菊(*Wedelia chinensis*)是菊科螞蟥菊属多年生草本植物,原产于美洲,20世纪70年代作为地被植物引入我国,已被列为“世界上最有害的100种外来入侵物种”之一,也是一种广泛分布于中国南方各省份的资源量大的植物。研究表明,该植物含有三萜类化合物、二萜类化合物、倍半萜类化合物、类黄酮、有机酸和类固醇等活性物质,具有抗炎、抗癌、抗氧化、抗微生物等功能^[4]。同时在植物保护领域也有抗虫、杀虫的功效,有研究表明,螞蟥菊提取液对莴苣指管蚜幼虫有显著的毒杀作用,7.5%的浓度毒杀效果最明显^[5]。南美螞蟥菊精油对赤拟谷盗、玉米象和绿豆象均有一定的熏蒸毒力、触杀毒力,对绿豆象种群抑制作用最明显,种群抑制率为37.63%~67.86%^[6]。因此螞蟥菊中的活性物质是优良的植物保护剂,具备开发利用价值,将其开发成植物源农药,能变害为利,既可控制入侵植物的危害,又能生产出对环境安全无公害的植物

源农药产品。

目前,螞蟥菊发酵液对根结线虫、斜纹夜蛾等有害生物的生物活性鲜有报道。通过微生物发酵法工艺制备螞蟥菊发酵液,研究该发酵液对根结线虫、斜纹夜蛾的生物活性,并通过LC-MS技术分析螞蟥菊发酵液的化学组分,以探讨是何种活性成分可能对有害生物的生长发育起控制作用,以期螞蟥菊提取液对作物害虫的防控提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

螞蟥菊取自厦门地区野外,干燥后粉碎,制成干粉末(过20目筛)备用;南方根结线虫采自厦门集美后溪镇蔬菜种植基地;斜纹夜蛾虫卵购于科云生物有限公司;枯草芽孢杆菌由山东苏柯汉生物工程有限公司提供;微生物菌剂由沃宝生物科技有限公司提供;纤维素酶、果胶酶由正宏生物科技有限公司提供;面包改良剂为师傅300复配面包酶制剂。

1.2 方法

1.2.1 发酵液的制备方法 发酵液配方为:1 kg 螞蟥菊干粉末,30 g 面包改良剂,2 g 枯草芽孢杆菌,10 g 微生物菌剂,2 g 纤维素酶,8 g 果胶酶,与15 L 水混合均匀,将混合物装入塑料桶中发酵,发酵起始温度为30~40℃,发酵时间30~50 d,即可得到螞蟥菊发酵液母液($67 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, FB)。

1.2.2 线虫悬浮液的制备 于2023年5月从厦门集美后溪镇蔬菜种植基地采集带有根结的病根,将病根冲洗干净,在解剖镜下用镊子或拨针挑取根结线虫卵囊,置于铺有两层面巾纸的干净培养皿上,3~5 d后收集2龄幼虫备用。

1.2.3 发酵液杀线虫活性的生物测定 按发酵液浓度设置为3个处理:母液(FB)、稀释10倍(FB10)、稀释100倍(FB100)。然后用移液枪吸取100 μL 线虫悬浮液(30~50条)于24孔细胞板上,再分别吸取100 μL 不同倍数稀释液,充分混合,盖上24孔板,置于室温下避光。同时以加100 μL 无菌水为空白对照(CK),3次重复。在处理24、48、72 h

后分别观察蟛蜞菊发酵液处理组和对照组线虫的死亡情况,加入 1~2 滴 1%的 NaOH 溶液,如果线虫保持不动,则认为线虫死亡^[7-8]。在显微镜下观察、统计线虫的存活数和死亡数,计算线虫死亡率和校正死亡率。

线虫死亡率/%= $\frac{\text{死亡线虫数}}{\text{供试线虫数}} \times 100$;

校正死亡率/%= $\frac{\text{处理组线虫死亡率}-\text{对照组线虫死亡率}}{1-\text{对照组线虫死亡率}} \times 100$ 。

杀线虫活性强弱的五级标准:校正死亡率≤10%,用“-”表示,为无活性;校正死亡率 10%~30%,用“+”表示,为弱活性;校正死亡率>30%~50%,用“++”表示,为中等活性;校正死亡率>50%~80%,用“+++”表示,为较强活性;校正死亡率在>80%,用“++++”表示,为强活性^[9]。

1.2.4 发酵液对斜纹夜蛾幼虫生长发育的影响 试验于 2023 年 9 月中旬开始,对蟛蜞菊发酵液母液进行稀释,分别稀释 5 倍(FB5)、15 倍(FB15)、45 倍(FB45),并以等量无菌水为对照(CK),用对应的稀释后的药液浸泡芋头叶 1 min 后取出晾干,放入培养管中。每个培养管放入 10 头斜纹夜蛾幼虫,每个处理重复 5 次。试验开始后每天观察幼虫的蜕皮情况,并记录蜕皮虫数,计算幼虫的发育历期,时间单位为 d。待幼虫化蛹后称测蛹质量,质量单位为 mg。

1.2.5 发酵液成分分析 2024 年 3 月,将蟛蜞菊发酵液在 4℃解冻,解冻后涡旋 1 min,混合均匀;精确移取适量样本于 2 mL 离心管中,浓缩干燥;接着加入 500 μL 甲醇溶液到干燥后的样本管中,涡旋 1 min;12 000 r·min⁻¹ 4℃离心 10 min,取全部上清液,转移至新的 2 mL 离心管中,浓缩干燥;加入 150 μL 80%甲醇水配制的 2-氯-L-苯丙氨酸(4 mg·L⁻¹)溶液复溶样品,取上清液过 0.22 μm 膜,过滤液加入到检测瓶中,用于 LC-MS 检测。

色谱条件:使用 ACQUITY UPLC® HSS T3 (2.1×100 mm,1.8 μm)色谱柱,0.3 mL·min⁻¹的流速,40℃的柱温,进样量 2 μL。正离子模式,流动相为 0.1%甲酸乙腈(B2)和 0.1%甲酸水(A2),梯度洗脱程序为:0~1 min,8% B2;1~8 min,8%~98% B2;8~10 min,98% B2;10~10.1 min,98%~8% B2;10.1~12 min,8% B2。负离子模式,流动相为乙腈(B3)和 5 mol·L⁻¹ 甲酸铵水(A3),梯度洗脱程序为:0~1 min,8% B3;1~8 min,8%~98% B3;8~10 min,

98% B3;10~10.1 min,98%~8% B3;10.1~12 min,8% B3。

质谱条件:电喷雾离子源(ESI),正负离子模式分别采集数据。正离子喷雾电压为 3.50 kV,负离子喷雾电压为-2.50 kV,鞘气 40 arb,辅助气 10 arb。毛细管温度为 325℃,以分辨率 70 000 进行一级全扫描,一级离子扫描范围 100~1000 m·z⁻¹,并采用 HCD 进行二级裂解,碰撞能量为 30 eV,二级分辨率为 17 500,采集信号前 3 离子进行碎裂,同时采用动态排除去除无必要的 MS/MS 信息。将发酵液样本中检测的特征峰分子质量、保留时间、二级谱图与植物谱图库进行比较、匹配,实现代谢物的定性、定量鉴定。

1.2.6 数据处理 采用 SPSS 22.0 软件对试验数据分析处理,并进行方差分析与数据检验,数据使用平均值±标准误(mean±SE)表示,*p*<0.05 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 蟛蜞菊发酵液对根结线虫 2 龄幼虫活性的影响

蟛蜞菊发酵液对根结线虫二龄幼虫抑杀的生物活性结果见表 1。

由表 1 可知,24 h 后,FB 处理的杀线虫活性为弱活性,其处理根结线虫 2 龄幼虫的校正死亡率为 25.54%,而 FB10、FB100 处理对线虫抑杀作用非常弱(FB100 处理的校正死亡率仅为 1.02%),处理 48、72 h 后,FB10、FB100 处理杀线虫活性均有所增强,表现为弱活性。

FB 处理在 48 h 和 72 h 后杀线虫活性依然表现为弱活性,校正死亡率均在 24%以上,且显著高于同时间段的 FB10、FB100 处理,两种稀释液的杀线虫效果无显著差异。

表 1 蟛蜞菊发酵液的杀线虫活性
Table 1 Nematicidal activity of *Wedelia chinensis* fermentation solution

处理 Treatment	校正死亡率 Corrected mortality rate/%		
	24 h	48 h	72 h
FB	25.54±5.33 a	24.67±2.32 a	24.89±2.78 a
FB10	2.37±1.23 b	11.78±2.81 b	12.98±1.81 b
FB100	1.02±1.85 b	10.13±1.57 b	10.44±1.56 b

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 螞蟥菊发酵液对斜纹夜蛾幼虫生长发育的影响

室内试验测定结果表明,螞蟥菊发酵液母液对斜纹夜蛾 1 龄幼虫具有一定的触杀作用,校正死亡率为 34.15%。但由于母液浓度下,幼虫无法存活到完成生长发育历程,故在后续的试验中摒除掉母液浓度,对其进行稀释 5 倍(FB5)、15 倍(FB15)、45 倍(FB5),探究螞蟥菊发酵液对斜纹夜蛾幼虫生长发育的影响。

由表 2 可知,FB5 和 FB15 处理斜纹夜蛾低龄
表 2 螞蟥菊发酵液对斜纹夜蛾幼虫生长发育历期的影响

Table 2 Effects of <i>Wedelia chinensis</i> fermentation solutions on the growth and developmental duration of the <i>Spodoptera litura</i>					
处理 Treatment	发育历期 Duration of development/d				
	1-2 J	1-3 J	1-4 J	1-5 J	1-6 J
FB5	5.53±0.64 a	9.24±0.90 ab	12.60±0.52 a	16.26±0.81 a	20.22±0.96 a
FB15	5.68±0.45 a	9.38±0.69 a	12.49±0.65 ab	16.21±0.71 a	20.15±0.66 a
FB45	4.49±0.58 b	8.42±1.06 b	11.99±0.68 bc	15.72±0.36 a	19.65±0.40 a
CK	4.27±0.87 b	8.34±1.16 b	11.82±0.88 c	15.48±0.95 a	19.62±0.54 a

注:幼虫到化蛹历经 6 个阶段,分别为 1、2、3、4、5、6 龄,1-2 J 表示幼虫在 1 龄过渡到 2 龄所需的天数,后面以此类推。

Note: The larva to pupation passes through six stages, namely, 1st, 2nd, 3rd, 4th, 5th, and 6th instars, and 1-2 J denotes the number of days required for the larva to transition from 1st to 2nd instar, and so on thereafter.

幼虫(1-2 J 阶段)的发育期较 CK 显著延长。在斜纹夜蛾高龄幼虫阶段(1-5 J、1-6 J),FB5 和 FB15 处理的发育历期延长,但与 CK 无显著差异。

螞蟥菊发酵液浸润芋头叶后喂食斜纹夜蛾幼虫化蛹后,各处理的蛹质量见表 3。

表 3 螞蟥菊发酵液对斜纹夜蛾蛹质量的影响
Table 3 Effects of *Wedelia chinensis* fermentation solutions on the pupal mass of the *Spodoptera litura*

处理 Treatment	蛹质量 Pupal mass/mg
FB5	391.71±83.54 a
FB15	403.57±104.97 a
FB45	463.67±85.91 a
CK	428.67±76.84 a

FB5 处理的蛹质量最低(为 391.71 mg),较 CK 降低了 8.62%,其次是 FB15 处理,较 CK 降低了 5.86%,FB45 处理对蛹质量的提高有促进的效果。故只有适宜浓度的螞蟥菊发酵液才能抑制蛹质量,FB5 处理抑制效果最佳,后期还需以该浓度为中心设计浓度梯度,探寻具有显著效果的浓度。

2.3 螞蟥菊发酵液成分的分析

利用 LC-MS 测定螞蟥菊发酵液母液总离子色谱(图 1)。经检测螞蟥菊发酵液共鉴定到 1166 种代谢物,相对含量 1%以上的成分见表 4。

由表 4 可知,螞蟥菊发酵液的主要成分为酚类、生物碱、有机酸、萜类和苯及其取代衍生物等。其中相对含量较高的有机物为甜菜碱(8.78%)、高龙胆酸(5.23%)、2,3-二羟基苯甲酸(3.04%)、D-酒石酸(2.53%)、乳酸内酯 A(1.79%)等。

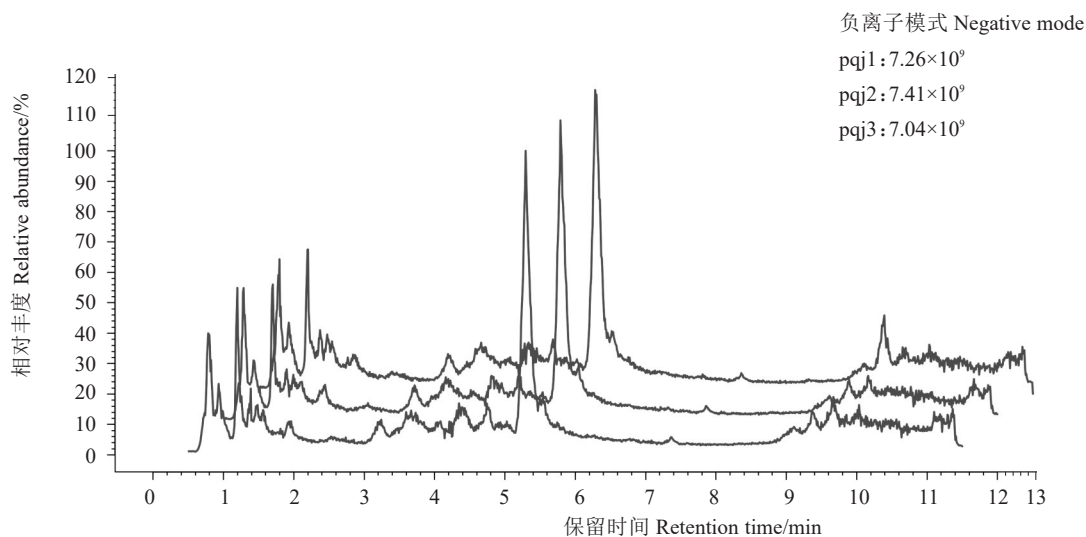


图 1 螞蟥菊发酵液挥发性组分 LC-MS 分析的总离子色谱图
Fig. 1 Total ion chromatogram of volatile components of *Wedelia chinensis* fermentation solutions analyzed by LC-MS

表 4 茀茀菊发酵液主要代谢物及其作用
Table 4 Main metabolites of *Wedelia chinensis* fermentation solution

编号 Number	物质 Substance	作用 Function	相对含量 Relative content/%
1	甜菜碱 Betaine	一种季铵型水溶生物碱,能够提高植物的抗逆性 A quaternary ammonium-type water-soluble alkaloid that enhances plant stress tolerance	8.78
2	高龙胆酸 Homogentistic acid	一种酚类化合物,具有抗自由基、抗氧化活性,对防止生物膜中的脂质过氧化非常重要 A phenolic compound with anti-free radical and antioxidant activity, important for preventing lipid peroxidation in biological membranes	5.23
3	2,3-二羟基苯甲酸 2,3-Dihydroxybenzoic acid	一种天然酚类,可用作医药中间体 A natural phenol, used as a pharmaceutical intermediate	3.04
4	D-酒石酸 D-Tartaric acid	属于有机酸类的一种,广泛用于药物制剂领域 It belongs to a kind of organic acid and is widely used in the field of pharmaceutical preparation	2.53
5	乳糖内酯 A Lactide A	—	1.79
6	苔色酸 Orsellinic acid	属于羧酸衍生物,具有抗氧化、抗肿瘤、降血脂等生物活性,可作为医药合成中间体使用 It belongs to carboxylic acid derivatives with biological activities such as antioxidant, antitumour, hypolipidemic and so on, and can be used as pharmaceutical synthesis intermediates	1.67
7	二氢咖啡酸 3,4-Dihydroxyhydrocinnamic acid	属绿原酸的一种代谢物,具有抗菌、抗病毒、抗肿瘤等生物活性 It is a metabolite of chlorogenic acid and has antibacterial, antiviral, antitumour and other biological activities	1.58
8	油酸酰胺 Oleamide	属于不饱和脂肪酰胺 It belongs to unsaturated fatty amides	1.43
9	槟榔碱 Arecoline	一种生物碱类化合物,抗寄生虫、抗菌、治疗心血管系统疾病等生物活性 An alkaloid with biological activities such as antiparasitic, antibacterial, and treatment of diseases of the cardiovascular system	1.40
10	2-哌啶甲酸 Pipelicolic acid	一种重要的刚性环状非蛋白质氨基酸,广泛用于许多手性药物和生物活性物质的制备,如局麻药罗哌卡因、抗精神病药物 An important rigid cyclic non-protein amino acid, widely used in the preparation of many chiral drugs and biologically active substances. For example, the local anaesthetic ropivacaine, antipsychotic drugs	1.23
11	3-乙基苯酚 3-Ethylphenol	属于酚类化合物,用作酚醛树脂、橡胶防老化剂、塑料抗老化剂、表面活性剂、非离子乳化剂、合成香料、农药的原料 It belongs to phenolic compounds and is used as raw materials for phenolic resins, rubber antioxidants, plastic anti-aging agents, surfactants, nonionic emulsifiers, synthetic fragrances and pesticides	1.16
12	DL-2-羟基戊酸钠 Sodium DL-2-hydroxyvalerate	属于有机酸类化合物,用于医药中间体 It belongs to the organic acid class of compounds and is used as a pharmaceutical intermediate	1.12
13	赤霉素 A53 Gibberellin A53	一种非常重要的植物类激素,属萜类物质,用于刺激植物的生长 A very important plant hormone, a terpenoid, used to stimulate plant growth	1.06

注:“—”代表暂无文献报道。
Note: The symbol ‘—’ denotes no literature report available.

3 讨论与结论

研究发现,多种植物提取物对根结线虫都有很好的抑杀效果。万寿菊的植物提取物在接触线虫 24 和 48 h 后,对线虫幼虫都有杀线虫作用,线虫死亡率高达 60.5%^[10]。任晶等^[11]研究发现,菊芋浸提

液对南方根结线虫的虫卵孵化和 2 龄幼虫的生长发育均有显著的抑制作用,并且能够显著减少番茄的根结数量和土壤根结线虫虫口密度而不影响番茄生长。Kesba 等^[12]发现,不同稀释度的一枝黄花和长春花水、乙醇提取物处理下 2 龄根结线虫死亡率都很高,水提取物比乙醇提取物对 2 龄根结线虫死亡

率更有效。穿心莲、金盏菊、沼菊、龙葵、马钱子、印楝、红甜椒、生姜、非洲刺槐豆等植物提取液均有一定的杀线虫活性,能够控制根结线虫的种群密度^[13]。

目前,对根结线虫有控制作用的植物次生代谢成分的药效研究,也不断有报道。研究表明甜瓜提取物中的葫芦素 A 和葫芦素 B 能够杀死体外的根结线虫幼虫并降低其在野外的种群密度^[14-15]。薄荷提取物对根结线虫表现出明显的杀线虫活性,采用色谱分析薄荷的提取物成分发现,精油中萜烯含量最高的是异薄荷酮、薄荷酮、薄荷醇、芸香芹酮;水提取物主要含有绿原酸、丹参酸 B、木犀草素-7-O-芸香糖苷和迷迭香酸^[16]。通过 GC-MS 分析具有控制线虫潜力的芳香植物精油,发现主要化合物有乙酸肉桂酯、丁香酚甲酯、肉桂醇、乙酰丁香酚、异丁香酚、丁香酚和苯甲酸苄酯等,此外,当将苯丙素化合物与香芹酮结合时,表现出了协同杀线虫活性^[17]。使用 GC-MS 技术鉴定出菖蒲提取液主要杀线虫化合物有没食子酸、丁香酸、羟基苯甲酸、绿原酸、阿魏酸、反肉桂酸和香豆酸^[18]。

本试验结果表明,螞蟥菊发酵液母液的杀线活性为弱活性,稀释液的杀线虫效果显著弱于母液,这表明植物提取物虽然有杀线虫活性,但与浓度密切相关。高强等^[19]研究发现,随着刺角瓜提取物浓度的降低,根结线虫的校正死亡率也会降低。柯云等^[20]研究发现,当螞蟥菊水提取液浓度为 10% 时,杀线虫活性为强活性,而本研究为弱活性,这可能是因为同一植物中的杀线虫活性物质的提取效果会因提取溶剂、提取方法等不同而有所差异。通过 LC-MS 技术发现螞蟥菊主要活性物质为甜菜碱(8.78%)。有研究发现,经海洋褐藻碱性提取物处理后,雌性根结线虫的数量显著减少,植物中的卵回收率也显著降低,这是因为海藻提取物中甜菜碱起关键的作用^[21]。

植物源提取物对斜纹夜蛾的控制作用报道并不罕见。Kaur 等^[22]发现,辣木的氯仿、乙酸乙酯和己烷提取物均显著提高了斜纹夜蛾的死亡率,其中正己烷提取物的活性最高,亚致死值为 $199 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,该植物提取物也可缩短斜纹夜蛾的整体发育周期。Kaur 等^[23]研究土木香己烷提取物对斜纹夜蛾的生物活性,发现提取物具有拒食作用和毒性作用,在 $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的质量浓度下,有中等的拒食效果,最大阻食率为 24.85%,饲料中添加 $1500 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的提取物,可显著提高斜纹夜蛾幼虫的死亡率,同时所有浓度的提取物均表现出很强的生长抑制作用,且呈剂量依赖性。Nebapure 等^[24]对百合的不同溶

剂提取物的拒食活性进行了分析,结果表明均对斜纹夜蛾有一定的拒食作用,氯仿提取物的拒食活性最好,其次是丁醇提取物,这两种的拒食效果优于印楝素,己烷提取物效果最差。杜浩等^[25]研究发现,以飞机草浸提液处理的香蕉叶喂养斜纹夜蛾幼虫,能够延长斜纹夜蛾幼虫和蛹的发育历期,并使斜纹夜蛾蛹质量降低,飞机草浸提液的浓度越高其负面影响越大。

在控制斜纹夜蛾的生物活性成分的研究方面,Yooboon 等^[26]研究表明,菖蒲、假苹拔、黑胡椒的乙醇提取物对斜纹夜蛾的 2 龄幼虫具有较强的毒性作用,可能是因为提取物中存在 β -细辛脑、(2E,4E,14Z)-N-异丁基-2,4,14-三烯酰胺、乙基异丁香酚、3,9-癸二烯醇-1,3-甲基-6-(1-甲基乙烯基)-4-戊基-1-(4-丙基环己基)1 环己烯和 α -细辛脑等化合物。Ruttanaphan 等^[27]通过 HPLC 分析毒性最强的野波罗蜜粗提物的化学成分,结果表明儿茶素对斜纹夜蛾的毒性最强,可能是斜纹夜蛾潜在的杀虫剂。Sahayaraj 等^[28]通过 GS-MS 检测具有杀斜纹叶蛾幼虫活性的苔藓提取物,发现共有 18 种化合物,其中含量比较高的化合物有 6-十八碳烯酸(Z)(29.7%)、十六烷酸(11.31%),这些化合物可能是导致斜纹夜蛾死亡的原因。

本研究表明螞蟥菊发酵液除了对斜纹夜蛾低龄幼虫表现出一定的触杀作用外,对斜纹夜蛾幼虫的生长发育也有一定的影响,具体表现为随着发酵液浓度升高,斜纹夜蛾的幼虫发育历期呈延长趋势,蛹质量也降低。在本研究设置的浓度范围内,低浓度螞蟥菊发酵液 FB45 处理对斜纹夜蛾幼虫的发育历期的影响较小,反而对其蛹质量有促进作用,而高浓度的发酵液才能够延长幼虫发育历期,并且抑制蛹质量的增加。本研究中螞蟥菊发酵液中相对成分 1% 以上的化合物有 13 种。研究表明甜菜碱可以降低根结线虫的卵回收率^[21],龙胆酸具有抗菌功效^[29],二氢咖啡酸是绿原酸的主要代谢物,而绿原酸对黏虫具有致死作用,亚致死浓度也会损害幼虫的生长和发育^[30]。螞蟥菊发酵液对根结线虫的杀线虫活性以及对斜纹叶蛾幼虫生长发育的抑制作用可能与上述的化合物有关,具体机制有待进一步研究。

综上所述,螞蟥菊发酵液($67 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)对南方根结线虫 2 龄幼虫有一定抑杀活性(校正死亡率 24% 以上),且稀释 10 倍和 100 倍的螞蟥菊发酵液在 48 h 后和 72 h 后也表现出弱杀线虫活性(校正

死亡率均达 10%以上)。螞蟥菊发酵液对斜纹夜蛾 1 龄幼虫的校正死亡率为 34.15%,螞蟥菊发酵液的 5 倍和 15 倍稀释液也具有抑制斜纹夜蛾幼虫的生长发育、延缓其发育历期、降低蛹质量的效果。螞蟥菊发酵液中主要含有甜菜碱、高龙胆酸、二氢咖啡酸等挥发性物质,这些植物次生代谢产物都具有在农业种植业中进行开发利用的潜能。螞蟥菊发酵液对根结线虫和斜纹夜蛾均具有一定的生物活性,可为后期开发针对根结线虫和斜纹夜蛾等有害生物防控的中草药源植物保护剂提供参考。

参考文献

- [1] 陆宴辉,刘杨,杨现明,等.中国农业害虫综合防治研究进展:2018 年—2022 年[J].植物保护,2023,49(5):145-166.
- [2] 李永华,王慧,董丹,等.臭氧水对茄子根结线虫的防治效果评价[J].植物保护,2022,48(4):369-373.
- [3] 刘潇.生物化学农药发展现状及趋势分析[J].化学工业,2021,39(1):53-58.
- [4] HUANG W H, LIANG Y Y, WANG J J, et al. Anti-angiogenic activity and mechanism of kaurane diterpenoids from *Wedelia chinensis*[J]. Phytomedicine, 2016, 23(3):283-292.
- [5] 许华,杨飘,余松夏,等.薇甘菊与三裂叶螞蟥菊粗提液对莴苣指管蚜的影响[J].湖北农业科学,2015,54(10):2390-2393.
- [6] 邓业成,李瑞钰,杨林林,等.加拿大一枝黄花和南美螞蟥菊精油的杀虫活性及化学成分[J].广西师范大学学报(自然科学版),2014,32(2):122-129.
- [7] 李运朝,李洪涛,及华,等.不同生物制剂对南方根结线虫杀虫活性与防治效果[J].农业环境科学学报,2022,41(12):2810-2816.
- [8] 付艳艳,张洁,朱文倩,等.南方根结线虫生防菌 YB-1503 菌株鉴定及作用机理研究[J].中国生物防治学报,2023,39(2):429-437.
- [9] 孙世伟,刘爱勤,苟亚峰,等.20 种植物提取物对南方根结线虫的毒杀活性[J].热带农业科学,2009,29(10):30-33.
- [10] ABO-ELYOUSR K A M, AWAD M E M, GAID M A. Management of tomato root-knot nematode *Meloidogyne incognita* by plant extracts and essential oils[J]. Plant Pathology Journal, 2009, 25(2):189-192.
- [11] 任晶,杨柳,程丽,等.菊芋植株不同部位浸提液对番茄生长及根结线虫的影响[J].中国蔬菜,2021(11):53-60.
- [12] KESBA H, ABDEL-RAHMAN A, SAYED S, et al. Screening the nematicidal potential of indigenous medicinal plant extracts against *Meloidogyne incognita* under lab. and greenhouse conditions[J]. Egyptian Journal of Biological Pest Control, 2021, 31(1):81.
- [13] MAKHUBU F N, KHOSA M C, MCGAW L J. South African plants with nematicidal activity against root-knot nematodes: A review[J]. South African Journal of Botany, 2021, 139:183-191.
- [14] DUBE Z P, MASHELA P W. Effects of cucurbitacin A on mobility of *Meloidogyne incognita* second-stage juveniles[J]. Research On Crops, 2018, 19(3):504-508.
- [15] POFU K M, MASHELA P W. Comparative efficacy of cucurbitacin phytonematicides and velum on growth and fruit quality of watermelon cultivar 'Congo' and suppression of *Meloidogyne enterolobii* under field conditions[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2022, 72(1):105-110.
- [16] CABONI P, SABA M, TOCCO G, et al. Nematicidal activity of mint aqueous extracts against the root-knot nematode *Meloidogyne incognita*[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(41):9784-9788.
- [17] ELOH K, KPEGBA K, SASANELLI N, et al. Nematicidal activity of some essential plant oils from tropical west africa[J]. Pest Manag, 2020, 66(2):131-141.
- [18] TARININI G, MELO A S, FONTANA L F, et al. Aqueous extracts of *Crambe abyssinica* seed cake: Chemical composition and potential for nematode control[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 156:112860.
- [19] 高强,张浩,任海龙,等.刺角瓜提取物对南方根结线虫的触杀活性研究[J].安徽农业科学,2022,50(8):122-125.
- [20] 柯云,潘沧桑.几种植物提取液对根结线虫的抑杀作用[J].厦门大学学报(自然科学版),2007,46(5):711-714.
- [21] WU Y, JENKINS T, BLUNDEN G, et al. Suppression of fecundity of the root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*, in monoxenic cultures of *Arabidopsis thaliana* treated with an alkaline extract of *Ascophyllum nodosum*[J]. Journal of Applied Phycology, 1998, 10:91-94.
- [22] KAUR M, CHOUDHARY A, SARAF I, et al. Efficacy of *Moringa oleifera* (Lam.) extract against *Spodoptera litura* (Fabricius), (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2022, 42:103-108.
- [23] KAUR M, SARAF I, KUMAR R, et al. Bioefficacy of hexane extract of *Inula racemosa* (Asteraceae) against *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. Gesunde Pflanzen, 2019, 71(3):165-174.
- [24] NEBAPURE S M, SRIVASTAVA C, WALIA S. Antifeedant activity of *Gloriosa superba* Linn. tuber extracts against *Spodoptera litura* (Fabricius)[J]. National Academy Science Letters-india, 2016, 39(5):333-336.
- [25] 杜浩,只佳增,赵丽娟,等.飞机草浸提液对斜纹夜蛾生长发育及种群参数的影响[J].生物安全学报,2022,31(2):151-155.
- [26] YOBOON T, PENGSOOK A, RATWATTANANON A, et al. A plant-based extract mixture for controlling *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae)[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2019, 6:5.
- [27] RUTTANAPHAN T, SONGOEN W, PLUEMPANUPAT W, et al. Potential insecticidal extracts from *Artocarpus lacucha* against *Spodoptera litura* (Lepidoptera: Noctuidae) larvae[J]. Journal of Economic Entomology, 2023, 116(4):1205-1210.
- [28] SAHAYARAJ K, RAVINDRAN C, THUSNAVIS M M. Three green seaweed extracts and their fractions for ecofriendly management of pestiferous insect *Spodoptera litura*[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2022, 19:7969-7980.
- [29] ABEDI F, RAZAVI B M, HOSSEINZADEH H. A review on gentisic acid as a plant derived phenolic acid and metabolite of aspirin: Comprehensive pharmacology, toxicology, and some pharmaceutical aspects[J]. Phytotherapy Research, 2020, 34(4):729-741.
- [30] LIN D J, FANG Y, LI L Y, et al. The insecticidal effect of the botanical insecticide chlorogenic acid on *Mythimna separata* (Walker) is related to changes in MsCYP450 gene expression[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:1015095.